

В.К. Лобанов, д-р техн. наук, Г.И. Пашкова, канд. техн. наук,  
Харьков, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РАМНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ

*Наведено результати досліджень методом електротензометрії рівня напружень в конструктивних елементах вантажопідійомної щогли у вигляді просторової зварної рамної конструкції при її навантаженні в процесі випробувань.*

*The results of research by the method of tenzometry for level of tensions in the structural elements of vantage mast as the spatial welded frame construction at its loading in the process of tests are reduced.*

Одной из важнейших задач современного промышленного производства машин и сооружений является снижение материалоемкости с одновременным повышением надежности и ресурса по критериям прочности. Развитие техники приводит к ужесточению условий эксплуатации, что создает значительные трудности в решении поставленной задачи.

Все более широкое использование в промышленности находят сварные соединения в рамных и балочных металлоконструкциях. Изучение прочности таких объектов также представляет значительный практический интерес. Главным этапом решения проблем обеспечения прочности и ресурса при проектировании машин и конструкций является определение деформаций, напряжений, перемещений и усилий, вызываемых силовыми и тепловыми нагрузками [1, 2].

Высокая эффективность современных вычислительных методов расчета с использованием компьютеров позволяет решать многие задачи при проектировании машин, включая оптимизацию формы и размеров деталей. Однако действительные нагрузки, обусловленные спецификой эксплуатации, особенно при аварийных и нештатных режимах, могут существенно отличаться от априорно принятых при проектировании. Кроме того, в ряде случаев при сложной конфигурации деталей и узлов и различных сочетаниях воздействующих нагрузок численные методы могут оказаться неэффективными для расчета напряженно-деформированного состояния из-за существенных и часто необоснованных упрощений. Поэтому для определения реальной нагруженности деталей машин и конструкций как на стадии проектирования, так и в процессе доводки опытных образцов, и особенно в реальных условиях эксплуатации, большое значение приобретают методы экспериментальной механики и, в частности, тензометрия. Натурная тензометрия позволяет определить действительные значения напряжений и деформаций в машинах и конструкциях, а также их изменения в рабочих условиях, т. е. получить надежные данные для оценки прочностных и ресурсных характеристик.

Целью настоящей работы являлось исследование методом тензометрирования уровня напряжений в конструктивных элементах грузоподъемной мачты, представляющей собой пространственную сварную рамную конструкцию, при её нагружении в процессе испытаний.

Высота грузоподъемной мачты составляет 35,8 м. Конструктивные элементы мачты – полые трубчатые заготовки с размерами 100,5×100,05×6,05; 80,5×80,05×6,05; 60,5×60,05×6,05 мм из стали 10ХСНД, механические характеристики которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические характеристики стали 10ХСНД (средние значения для использованных труб)

Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Модуль упругости, Е, ГПа	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона, $\mu$
580	390	197	7640	0,3

Изучение значений напряжений при нагружении мачты проводили в различных точках, расположенных на нескольких уровнях по длине конструкции. Для исследования напряжений выбирались наиболее нагруженные точки в соответствии с прочностным расчетом мачты. Расчетная модель построена на основе пакета программ моделирования и конечно-элементного анализа MSC/NASTRAN for Windows [3]. Точки измерения находились на вертикальных стойках мачты, представляющих собой трубы с размерами 100,5×100,05×6,05 мм. Установленные в результате предварительных числовых расчетов допускаемые напряжения в материале мачты при нагрузке, соответствующей эксплуатационной, достигают по абсолютной величине 350 МПа и являются сжимающими.

Определение деформаций для расчета напряжений в заданных точках при нагружении мачты производили методом электротензометрии [4]. Использование прямоугольных розеток тензорезисторов типа КФ5П1-10-100-Б12 с коэффициентом тензочувствительности равным 2,02 позволило получить достаточно полную картину деформированного состояния в заданных точках. Термокомпенсационные тензорезисторы наклеивали аналогично рабочим на пластины из стали 10ХСНД, которые крепили на стойки мачты непосредственно вблизи рабочих розеток. От воздействия окружающей среды тензорезисторы защищали с помощью резиновых пластин. Для определения деформаций были использованы полумостовые измерительные схемы подключения тензорезисторов. Расчет максимального и минимального напряжений производился по известным формулам [4].

Выходные сигналы тензорезисторов в ненагруженном состоянии и при нагружении мачты фиксировались с помощью измерительных тензометрических систем СИИТ-3. Современный тензометрический эксперимент, как правило, требует одновременной и синхронной регистрации деформаций и других величин, поэтому в последнее

время находят все большее применение информационно-измерительные системы, позволяющие решить эту задачу. Сбор и обработка информации, получаемой от тензорезисторов, осуществлялись в настоящем исследовании с использованием специально сформированного информационно-измерительного комплекса, структура которого приведена на рис. 1.

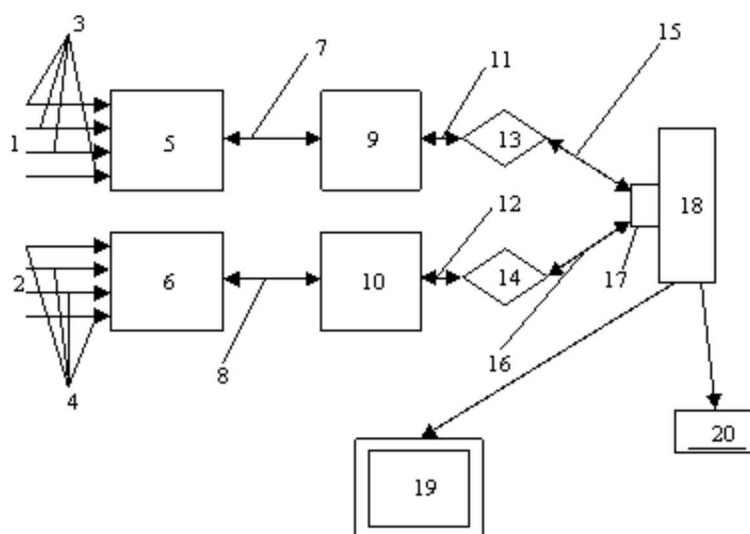


Рис. 1. Схема информационно-измерительного комплекса:

- 1, 2 – тензорезисторы; 3, 4 – монтажные кабели длиной 5 м;  
 5, 6 – блоки дистанционного релейного переключения (БДРП) системы СИИТ-3;  
 7, 8 – кабельные системы; 9, 10 – блоки измерений (БИ) системы СИИТ-3;  
 11, 12, 15, 16 – соединительные кабели; 13, 14 – адаптерные устройства АУС-СП;  
 17 – мультипортовая плата MOXA CP-114 IS; 18 – системный блок персонального компьютера (ПК); 19 – монитор ПК; 20 – принтер

Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить компьютерную обработку поступающей информации и рассчитывать значения напряжений в элементах конструкции мачты непосредственно в ходе испытаний, а, следовательно, оперативно оценивать текущее состояние натурного объекта и влиять на ход эксперимента.

Для оценки работоспособности информационно-измерительного комплекса и программного обеспечения была проведена предварительная тарировка измерительной схемы с использованием натуральных образцов, выполненных из полый трубчатой заготовки 100,5×100,05×6,05 мм, применяемой при изготовлении мачты. Один из образцов являлся рабочим и подвергался статическому сжатию усилием от 0,4 до 0,8 МН на гидравлическом прессе модели ПД 476. На второй образец наклеивались тензорезисторы, используемые в качестве термокомпенсационных. Данный образец располагался вблизи рабочего, но нагружению не подвергался. При этом в лаборатории были проимитированы все условия передачи информации, планируемые к использованию в условиях испытательного полигона.

Статистически обработанные результаты тарировочных экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тарировки образцов из стали 10 ХСНД

Усилие нагружения на прессе, МН	Значения напряжений, МПа	
	расчетное	экспериментальное (усредненное)
0,4	-165,3	-158,3
0,6	-268	-261,7
0,7	-314	-318,4
0,8	-350	-352,4

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности сформированного информационно-измерительного комплекса, его стабильной и надежной работе в лабораторных условиях при создании в элементах конструкции мачты напряжений до 350 МПа. Значения напряжений, полученные в процессе обработки с использованием персонального компьютера показаний тензорезисторов при нагружении образца, близки к расчетным данным для соответствующих величин усилия нагружения. Разница между расчетными и экспериментальными значениями составляет 0,6-4,4 %.

Фиксация и анализ показаний тензорезисторов при нагружении грузоподъемной мачты в процессе испытаний, расчет значений напряжений в заданных точках и построение графиков распределения напряжений по высоте мачты осуществлялись непосредственно в условиях испытательного полигона. В соответствии с требованиями инструкции по эксплуатации тензометрической системы СИИТ-3 длина кабелей от тензорезисторов до БДРП не должна превышать 5 м. Поэтому блоки БДРП фиксировали в заданном положении и размещали в специальных контейнерах, закрепленных на мачте. Блоки БИ и адаптерные устройства располагали вблизи мачты и с помощью кабелей связи соединяли с соответствующими БДРП и персональным компьютером, находящимся в безопасной зоне. Температура

испытаний находилась в пределах  $+15...+18^{\circ}\text{C}$ .

Измерение показаний тензорезисторов в ненагруженном положении мачты производилось трижды, и определялась работоспособность каждого тензорезистора. Замер показаний тензорезисторов при нагружении мачты и расчет величины напряжений в заданных точках осуществлялись в соответствии с указанным усилием нагружения. Погрешность определения значений напряжений составляла 5-10 МПа. Информация о результатах тензометрирования представлялась в виде таблиц и графиков распределения напряжений в соответствующих точках по высоте мачты.

В процессе предварительных и сдаточных испытаний грузоподъемная мачта подвергалась статическому нагружению усилием от 0,3 до 1,7 МН.

Изучение распределения напряжений по высоте мачты показывает, что наиболее нагруженными в большинстве случаев являются точки, расположенные на правой и левой передних ее стойках на высоте 17,8 м от уровня основания.

На рис. 2 графически представлены обобщенные результаты тензометрирования мачты в процессе испытаний. Полученные данные свидетельствуют о том, что графическая аппроксимация обобщенной зависимости значений максимальных напряжений от величины усилия нагружения мачты по характеру близка к линейной, т.е. конструкция работает в упругой области.

Максимальные напряжения, возникающие в элементах конструкции мачты, являются сжимающими во всех случаях. Минимальные напряжения, обусловленные одновременным влиянием деформации сжатия, изгиба и скручивания, зафиксированы как сжимающими, так и растягивающими.

Наибольшее значение максимального напряжения, полученное при нагружении мачты усилием 170 тс, составляет - 181,13 МПа. По абсолютной величине указанное значение в 1,9 раза ниже допускаемой величины напряжений равной 350 МПа

Показания тензорезисторов в ненагруженном состоянии и после снятия усилия нагружения близки между собой. Это подтверждает, что тензорезисторы сохранили работоспособность, а деформация мачты в процессе нагружения является упругой.

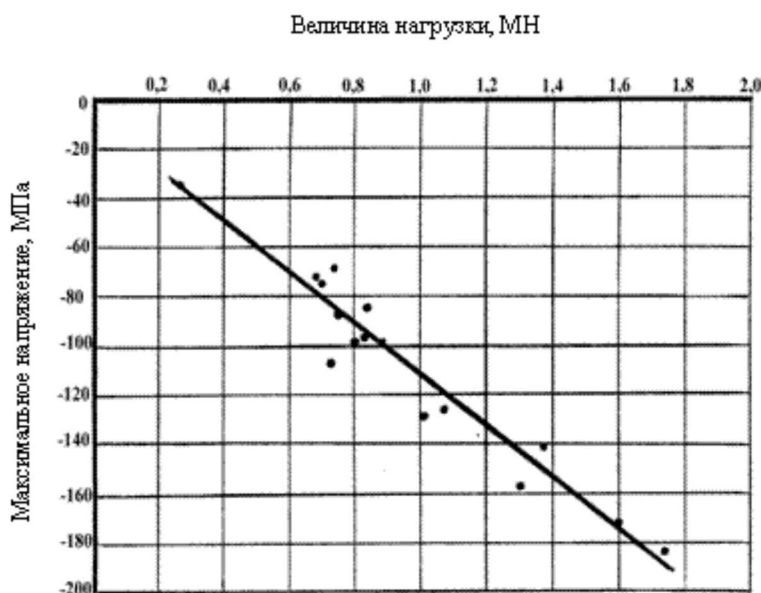


Рис. 2. Графическая аппроксимация обобщенной зависимости значений максимальных напряжений от величины усилия нагружения

Проведенные исследования позволяют достоверно оценить прочность натурального объекта и уточнить ресурс эксплуатации с учетом реальной нагруженности по данным тензометрии.

Таким образом, выполненная работа по тензометрированию и исследованию напряженно-деформированного состояния сварной грузоподъемной мачты при ее нагружении в процессе испытаний показывает, что конструкция мачты обеспечивает необходимый запас прочности для грузоподъемных устройств.

**Список литературы:** 1. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Хуриудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. – М: Машиностроение, 1989. – 240 с. 2. Кудрявцев И.В., Наумченко Н.Е. Усталость сварных конструкций. – М: Машиностроение, 1976. – 271 с. 3. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows – М: серия «Проектирование», 2001. 4. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – 352 с.

Поступила в редакцию 05.04.09.